

0-732867-|

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

УДК 550.8.053:519 + 550.382.3

МИШЕНИН СЕРГЕЙ ГРИГОРЬЕВИЧ

**ПЕТРОМАГНЕТИЗМ ТРАППОВЫХ ПОРОД СЕВЕРО-ВОСТОКА
ТУНГУССКОЙ СИНЕКЛИЗЫ**

**Специальность: 25.00.10 – Геофизика,
геофизические методы поисков полезных ископаемых**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук**

Казань – 2002

Научный руководитель: кандидат геолого-минералогических наук
доцент Ш.З.Ибрагимов

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук
профессор Б.В. Буров (КГУ, г.Казань);
кандидат геолого-минералогических наук
Л.В.Халепп (ЦНИИГеолнеруд, г.Казань)

Ведущая организация: Объединенный институт геологии и
геофизики СО РАН (г. Новосибирск)

Защита состоится 19 декабря 2002 года в 14.00 часов на заседании Диссертационного
совета Д 212.081.04 по защите диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-
минералогических наук при Казанском государственном университете по адресу:

420008, г. Казань, ул. Кремлевская 4/5

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского
государственного университета.

Автореферат разослан «16» ноября 2002 года.

Ученый секретарь Диссертационного
Совета Д212.081.04, кандидат геолого-
минералогических наук



Д.И. Хасанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В ходе алмазописковых работ большие объемы геолого-разведочных работ (ГРР) выполняются на северо-восточном и восточном бортах Тунгусской синеклизы и северо-восточном фланге Вилуйской синеклизы. Все эти районы характеризуются широким распространением разновозрастного траппового магматизма. Влияние пород трапповой формации и контролирующих их структур необходимо учитывать при построении палеоструктурных, тектонических, прогнозных карт различных масштабов, интерпретации геофизических полей. Изучение физических свойств перекрывающих кимберлиты горных пород (в том числе траппов) также является одной из необходимых предпосылок для создания обобщенных прогнозно-поисковых и интерпретационных моделей, используемых для повышения эффективности геолого-геофизических работ, совершенствования их методики. Кроме того, в процессе создания Гостеолкарты-200 нового поколения возникает задача построения региональных корреляционных схем траппового магматизма для создания и взаимоувязки легенд различных её серий листов. Принятая в 1987 году схема классификации трапповых пород региона устарела и уже не используется при производстве ГРР.

В связи с вышеизложенным, необходима разработка методов и принципов достоверного расчленения, классификации и корреляции пород траппового комплекса на основе использования объективных, количественно характеризующих признаков, получаемых в результате геофизических и аналитических исследований этих пород.

Целью настоящей работы является изучение петромагнитных характеристик пород трапповой формации в комплексе с другими данными для решения задач их классификации, геологического картирования и интерпретации геофизических полей.

Основные задачи исследований:

1. Формирование базы экспериментальных данных по трапповым породам северо-восточного борта Тунгусской синеклизы, включающий их петрофизические и петрохимические характеристики.
2. Создание алгоритмов статистической обработки петрофизических и петрохимических данных.
3. Разделение пород на статистически устойчивые группы по вещественно-физическим характеристикам (петромагнитные, петрохимические и т.п.)
4. Использование выделенных групп для геологической классификации, районирования пород трапповой формации и интерпретации потенциальных полей на траппонасыщенных площадях.

Фактический материал. В основу диссертации положены результаты работ, выполненных в Амакинской ГРЭ АК «АЛРОСА» при поисках коренных источников алмазов на северо-восточном борту Тунгусской синеклизы в 1989-2000 годах. Автор принимал непосредственное участие в качестве ответственного исполнителя при производстве полевых, лабораторных и камеральных специализированных исследованиях в 1989-1994 годах, а с 1995 года по 2001 год – в тематических исследованиях по данной проблеме. В процессе работы был собран и обработан большой аналитический и фактический материал, включающий 1275 петрохимических анализов, 709 комплексных магнито-минералогических анализов и свыше 16800 определений интегральных магнитных и плотностных свойств трапповых пород.

Методика исследований. Лабораторные петрофизические исследования включали в себя определение плотности, магнитной восприимчивости и естественной остаточной намагниченности. При проведении палеомагнитных и магнито-минералогических исследований получены направление и модуль вектора естественной остаточной намагниченности, характеристики коэрцитивных спектров образцов, кривые дифференциального термоманитного анализа и термоманитного анализа по намагниченности насыщения. Петрохимическая база данных содержит результаты силикатных анализов траппов, каждый образец охарактеризован петрографически. Методика построения петромагнитной модели включала: независимый статистический анализ петрохимической и петромагнитной баз данных с обоснованным выделением групп траппов по каждой базе данных; анализом совпадения и отклонения результатов совместной обработки петромагнитных и петрохимических баз данных; полученные результаты сопоставлены с независимой статистической обработкой базы интегральных магнитных и плотностных свойств траппов.

Основные защищаемые положения.

1. Существуют устойчивые группы траппов, в пределах северо-восточного борта Тунгусской синеклизы, характеризующиеся определенными, петрофизическими (петромагнитными), петрохимическими и геологическими свойствами.
2. Магнитная восприимчивость, направление и модуль вектора естественной остаточной намагниченности, параметры, характеризующие доменную структуру ферромагнитной фракции, являются наиболее значимыми для петромагнитной классификации пород трапповой формации.
3. Разработан алгоритм статистической обработки экспериментальных баз данных и классификации трапповых пород по совокупности петрофизических характеристик (плотности, магнитной восприимчивости и естественной остаточной намагниченности).
4. Петромагнитная модель траппов северо-востока Тунгусской синеклизы может быть

использована при построении региональных схем классификации трапповых пород, а также интерпретации потенциальных полей на траппонасыщенных площадях.

Научная новизна:

1. Создана наиболее полная на сегодняшний день экспериментальная база данных по породам трапповой формации северо-востока Тунгусской синеклизы, включающая измерения интегральных магнитных параметров и плотности, результаты магнитно-минералогических исследований и силикатного анализа.
2. Разработана методика разделения траппов на статистически устойчивые группы, значительно отличающиеся друг от друга по петромагнитным характеристикам.
3. Создана и впервые использована петромагнитная модель пород трапповой формации северо-востока Тунгусской синеклизы при интерпретации потенциальных полей на траппонасыщенных площадях.

Практическое значение. В результате проведенных исследований выделены группы трапповых пород и сформирована петромагнитная модель трапповых пород северо-востока Тунгусской синеклизы, что позволяет:

- обосновать и развить региональную схему классификации пород трапповой формации с возможностью последующего её использования при построении комплекта геологических карт масштаба 1:200000 нового поколения Айхальской серии листов;
- использовать их при детальном палеоструктурном и геологическом построении (разрезов и карт) в пределах кимберлитоперспективных участков исследуемой территории;
- проводить районирование, интерпретацию и моделирование потенциальных геофизических полей, в том числе с использованием современных компьютерных интегрированных систем интерпретации, при этом существенно повышая достоверность получаемых результатов и сокращая время на их получение;
- определить направления дальнейшего рационального использования данных петромагнитных методов, повышения их практической значимости при ведении ГРР на площадях развития пород трапповой формации.

Публикации и апробация работы. По теме диссертации опубликовано 8 работ. Отдельные результаты исследований изложены в 3-х производственных и тематических отчетах Амакинской ГРЭ. Основные положения работы докладывались и обсуждались на различных геологических совещаниях в АК «АЛРОСА», совещании «Проблемы геологии металлогении северо-востока Азии на рубеже тысячелетий» (Билибинские чтения, Магадан, 2001 г.) и Всероссийском семинаре по палеомагнетизму и магнетизму горных пород (п.Борок, 1999 г.), а также на ежегодных научных конференциях Казанского госуниверситета (1994, 1998).

Структура и объем работы. Работа общим объемом 192 страницы состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка из 128 наименований. Текстовая часть диссертации включает 70 рисунков и 43 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приводится геологическая характеристика пород трапповой формации северо-восточного борта Тунгусской синеклизы, в пределах которой расположен район исследований данной работы. Подробно рассматриваются и анализируются многочисленные, часто противоречивые, точки зрения о причинах многообразия и распространенности пород трапповой формации, и как следствие – проблемы их классификации. Приводится детальный анализ магнитных свойств пород трапповой формации.

Территория исследований находится в пределах крупного тектонического блока в северо-восточной части Тунгусской синеклизы, выделяемого как Айхальский кратон. По геолого-геофизическим данным здесь выделяются два структурных этажа: кристаллический фундамент и осадочный чехол. Платформенный чехол слагают карбонатные отложения верхнего протерозоя, нижнего и среднего палеозоя, терригенные отложения верхнепалеозойского возраста и породы пермо-триасовой трапповой формации. Породы осадочного чехла подразделяются на 4 структурных яруса: венд-нижнепалеозойский, среднепалеозойский, верхнепалеозойский и верхнепалеозойско-раннемезозойский. Среднепалеозойский структурный ярус сложен терригенно-карбонатными отложениями силура и девона и представляет особый интерес в связи с массовым проявлением на данной территории магматических образований кимберлитовой формации, выделенной в Далдыно-Алакитский кимберлитовый комплекс (iD_3-C_1da). Верхнепалеозойский структурный ярус представлен терригенными отложениями нижнего карбона – верхней перми, залегающими с угловым и стратиграфическим несогласием на отложениях венд-нижнепалеозойского и среднепалеозойского структурного яруса.

Верхнепалеозойский–нижнемезозойский (пермо-триасовый) структурный ярус отделен от верхнепалеозойского региональным стратиграфическим и угловым несогласием и представлен вулканогенными и интрузивными породами трапповой формации. В целом, за исключением отдельных впадин и крупнообъемных обособленных магматических структур, мощности трапповых образований, залегающих выше карбонатного цоколя, варьируют в пределах 150 ± 50 м. Общепринятого стратиграфического разделения вулканогенных образований данной территории не существует, на уровне современной изученности они представлены туфогенной (P_2-T_{1lf}) и туфоластовой (P_2-T_{1tl}) толщами. К настоящему времени вулканогенная толща в значительной степени разрушена эрозией, в пределах Алакит-

Мархинского кимберлитового поля эффузивные образования распространены фрагментарно. Интрузивные образования пользуются преимущественным развитием среди пород трапповой формации района исследований. По характеру залегания и форме тел среди интрузий выделяются пластовые и пологосекущие интрузии, секущие интрузии неправильной формы, реже дайки и штоки.

Магматические образования, относящиеся к формации траппов древних платформ, отличаются повышенными, по отношению к другим формациям, содержаниями окисного железа, марганца и пониженными – закисного железа, калия и фосфора. Они представлены базальтами (редко риолитами), долеритами, а также дифференциатами долеритов: пикритами, диабаз-пегматитами, феррогаббро и гранофирами.

Изучению вопросов эволюции основных пород было посвящено значительное число отечественных и зарубежных работ, результаты которых изложены в многочисленных научных публикациях в специальной периодике, тематических сборниках и монографиях. Основной целью этих исследований было решение главного генетического вопроса базитового магматизма – определение состава исходной магмы и механизма возникновения всего многообразия основных пород, в том числе и траппов. Сегодня не существует общепринятой теории эволюции базитового магматизма, а роль различных факторов, приводящих к наблюдаемому в природе многообразию проявлений основных пород, оценивается разными исследователями крайне неодинаково, вплоть до противоположных оценок. Имевшиеся к настоящему времени данные однозначно не опровергают существующие гипотезы. Однако большинство наблюдаемых фактов траппового магматизма наиболее полно согласуются с моделью гетерогенности мантии литосферных плит, особенно при континентальном типе коры с наличием обогащенных участков, отражающих древние зоны субдукции. В этом случае находят объяснение общая обогащенность трапповых пород континентов некогерентными элементами, последовательное истощение выплавов во времени, региональные и провинциальные различия химического состава, большие вариации отношений $^{87}Sr/^{86}Sr$ в продуктах инициальных стадий магматической активности и т.д.

Существуют сложности и в установлении единообразной классификации и номенклатуры трапповых пород. Весьма точно состояние с классификацией трапповых пород отражено в Методическом пособии по геологической съемке (Рябенко А.А. и др., 1983): «По отношению к породам трапповой формации фактическое состояние рассматриваемого вопроса [терминологии, классификации и петрографической номенклатуры траппов и т.п.] таково, что можно говорить о практическом отсутствии сколько-нибудь удовлетворительной систематики траппов». В последние годы преимущество отдано петрохимическому разделению пород трапповой формации, но у авторов различных схем также нет единодушия

ни в наименовании, ни в объеме выделяемых таксонов. Как следствие, не было получено общепринятой классификации и четко установленных пределов относимости тех или иных трапповых пород к определенной петрохимической серии. Общим слабым местом петрохимических классификаций траппов является то, что фактическое расчленение производится после анализа химизма всего набора пород предполагаемого таксона, причем объединение проб из различных точек наблюдения в один тип обычно основано на полевых или иных, часто интуитивно и субъективно выбранных признаках. Ошибки такого выбора автоматически переносятся и в петрохимические построения, кроме этого, размывая границы выделенных таксонов.

Таким образом, необходимо расширять объективную базу критериев классификации трапповых пород, в том числе и за счет петрофизических характеристик. Петрофизические, в частности петромагнитные, методы могут сыграть заметную роль в изучении режимов формирования трапповых пород, так как изменчивость физических свойств этих пород является отражением существующего их многообразия в природе.

Петромагнитные исследования траппов Сибирской платформы проводились, начиная со второй половины 50-х годов. Практически все исследования физических свойств трапповых пород сводились к определению значений плотности пород, магнитной восприимчивости (χ или MB), естественной остаточной намагниченности (I_n или ЕОН) и ее направления (для ориентированных образцов), фактора Кенисбергера (Q). В результате проведенных многолетних исследований выяснилось, что породы трапповой формации характеризуются большой изменчивостью физических свойств, особенно магнитных. Палеомагнитные исследования траппов позволили выделить среди них породы разных по направлению ЕОН комплексов. По данным выполненных петромагнитных исследований магнитные свойства пород трапповой формации, в подавляющем большинстве случаев, определяются содержанием в них акцессорных минералов: титаномagnetитов и гематитов.

Попытки разделения раннемезозойских траппов исследуемой территории на петромагнитные группы предпринимались многими исследователями (Эринчек Ю.М. и др., 1993; Мишенин С.Г., 1994; Сунцова С.П., 1999 и др.). В основу разделения были положены различия траппов по MB, ЕОН, фактору Кенисбергера и направлению вектора ЕОН. Дополнительно привлекались сведения о геологических взаимоотношениях трапповых тел, выявленных во время геолого-съемочных и буровых работ и карты аномального магнитного поля. Всеми исследователями подтверждается наличие нескольких разновидностей трапповых пород, различающихся по значениям χ и Q, значению и ориентировке вектора I_n . Однако пределы конвергентности этих разновидностей трапповых пород по выше-

перечисленным параметрам достаточно широки и однозначная идентификация конкретного траппового тела крайне затруднительна даже при использовании данных других геолого-геофизических методов.

В ходе работ последних десяти лет была получена достаточно обширная коллекция трапповых пород с площади, фактически охватывающих северо-восточную часть Тунгусской синеклизы. Полученные данные аналитических исследований (силикатных и спектральных анализов, петрографических наблюдений) были дополнены специальными петромагнитными исследованиями. Кроме того, в процессе подготовки к данной работе, все определения плотности, MB, ЕОН и ее направления, выполненные в предшествующие годы на исследуемой территории, впервые были собраны в отдельную базу данных. Наличие сводной базы данных и вновь полученные аналитические данные позволили вернуться к рассмотрению вопросов типизации трапповых пород на качественно другом уровне.

Во второй главе рассматриваются вопросы формирования базы экспериментальных данных, включая описания методики и аппаратуры полевых и лабораторных исследований трапповых пород. Приведено обоснование методики статистического анализа для обработки данных.

Экспериментальная база данных для трапповых пород исследуемой территории основывается на изучении коллекций образцов, отобранных в ходе многолетних разноплановых геологических работ, включавших:

1. Опробование трапповых пород в ходе геолого-съемочных и поисковых работ, где в точках наблюдений эпизодически отбирались единичные неориентированные образцы горных пород.
2. Опробование керна структурно-картировочных и заверочных скважин через 5 метров.
3. Отбор образцов в ходе специализированных петрофизических маршрутов. На первом этапе (1975-1983 г.г.) основное внимание уделялось изучению коренных выходов трапповых пород, но оказалось, что ряд разновидностей трапповых пород в силу структурно-текстурных особенностей не образуют коренных выходов, в редких случаях производился отбор образцов на другие виды аналитических исследований. На втором этапе (1989-2001 г.г.) образцы отбирались в коренном залегании, но большее внимание уделялось равномерности и достоверности опробования трапповых пород различных фаз внедрения и их взаимоотношениям в геологическом разрезе, картирования простираения и выходов траппов на дневную поверхность. Возросло количество отбора образцов на другие виды аналитических исследований для обеспечения комплексного изучения пород.

Лабораторные петрофизические исследования трапповых пород выполнялись, в основном, в лаборатории Амакинской ГРЭ и включали в себя:

- определение плотности на воздушно-сухих образцах методом гидростатического взвешивания;
- определение магнитной восприимчивости и естественной остаточной намагниченности образцов условно-изометричной формы с помощью аstaticических магнитометров;
- определение магнитной восприимчивости образцов произвольной формы на измерителях магнитной восприимчивости ИМВ-2 и капламостика KLY-2.

При анализе погрешностей измерений соответствующее место уделялось внешнему контролю. Образцы посылались на контрольные измерения в лаборатории ИГО «Якутскгеология», ЛГУ, НИИГА и ВИРГ, а с 1991 года – в Палеомагнитную лабораторию Казанского государственного университета (ПЛ КГУ). Фактические расхождения в значениях не превышали стандартных аппаратных погрешностей измерений.

С 1991 года значительная часть образцов направляется в ПЛ КГУ для проведения палеомагнитных и магнитно-минералогических исследований, что включало в себя:

- измерения направления и модуля вектора ЕОН и магнитной восприимчивости, включая ступенчатые термочистки до 350°C и чистку переменным магнитным полем с максимальной напряженностью поля 40 кА/м;
- измерения характеристик, получаемых в результате обработки коэрцитивных спектров образцов: намагниченность насыщения (I_s), остаточная намагниченность насыщения (I_{rs}), коэрцитивная сила (H_c) и поле, разрушающее I_{rs} (H_{cr});
- кривые дифференциального термомагнитного анализа $I_s(T)$ в интервале температур минус 180°C до 750°C;
- кривые термомагнитного анализа $I_{rs}(T)$ и диаграммы Вильсона $\ln(T)$.

Результаты всех лабораторных измерений трапповых пород изучаемой территории были сведены в общую базу данных. Она содержит сведения о плотности (σ), магнитной восприимчивости (МВ или χ), естественной остаточной намагниченности (ЕОН или I_n) и факторе Кенисбергера (Q) трапповых пород, измеренных на 16827 образцах, и является на сегодня наиболее полной сводкой такого рода. Для 7713 ориентированных образцов траппов приводятся значения углов D и J , характеризующих направление вектора ЕОН.

Магнитные свойства горных пород определяются условиями образования и всеми процессами, произошедшими в породе после ее образования. Диагностические возможности петромагнитных методов исследования горных пород обусловлены решением вопроса об однозначности (или определения косвенных взаимосвязей) их магнитных характеристик с условиями образования или с процессами, произошедшими в породе.

Ферромагнитная фракция пород трапповой формации по составу, по доменному строению ферромагнетиков и по концентрации отдельных типов ферромагнетиков, является

сложной. Измеряемые магнитные свойства пород зависят от геологических условий еще более сложным образом и в большинстве случаев они обусловлены влиянием всех вышеназванных факторов. Очевидно, что использование только интегральных магнитных характеристик (χ , I_n , Q) при изучении трапповых пород не может принести ожидаемых результатов. Из анализа ранее выполненных работ следует, что построение петромагнитных моделей траппового комплекса пород с использованием только интегральных магнитных параметров не имеет однозначного решения ввиду значительной ширины интервалов конвергентности выделяемых разновидностей траппов по этим параметрам.

Для уменьшения интервалов перекрытия параметров разновидностей трапповых пород необходимо расширять исходную базу данных, используя не только интегральные магнитные характеристики, но также магнитные параметры, описывающие состав и структуру ферромагнитных минералов траппов. Возникает вопрос о формализации этих дополнительных магнитных характеристик, потому что получаемые в магнитно-минералогических методах зависимости различных видов намагниченности от воздействия температурой, переменным магнитным полем и т.д. представляют собой значительные по объему разнотипные массивы данных. Это затрудняет, а порой делает невозможным статистическую обработку результатов магнитно-минералогического анализа.

Для привлечения данных магнитно-минералогического анализа в построении петромагнитных моделей траппов необходимо предварительно обработать эти кривые, выделить из них наиболее информативные параметры. В результате анализа кривых $I_s(T)$ было установлено, что магнитные свойства образцов трапповых пород, в значительной степени, обусловлены содержанием в них зерен титаномагнетита. Все кривые $I_s(T)$, полученные по образцам трапповых пород, были разделены на четыре группы групп. За основу деления было принято состояние зерен титаномагнетита:

1. Образцы со структурами спиноподобного распада титаномагнетитов;
2. Образцы, содержащие неизмененный, или слабо измененный, титаномагнетит;
3. Образцы, содержащие гетерофазноокисленный титаномагнетит;
4. Образцы, содержащие гомофазноокисленный титаномагнетит (титаномаггемит).

Для статистической обработки результатов петромагнитных измерений были выделены следующие информативные параметры, значимо характеризующие особенности вышеперечисленных состояний титаномагнетитов в трапповых породах:

- значения χ , I_n , Q , для образцов в исходных условиях, после нагрева до 300°C и после чистки переменным магнитным полем $H=300$ Э (магнитная стабильность I_n/I_n);
- коэрцитивные характеристики: H_c , H_{cr} , H_{cr}/H_c ;
- значения индуцированных и остаточных намагниченностей насыщения: I_s , I_{rs} и

производных от них параметров Qrs , Irs/Is ;

- значения уровней парамагнитного фона кривых ДТМА первого ($fon1$) и повторного ($fon2$) нагревов и их разности $Rf = fon1 - fon2$.

База результатов детальных магнитно-минералогических исследований образцов траппов объединяет измерения по 709 образцам траппов.

Петрохимическая база данных содержит результаты силикатных анализов трапповых пород и насчитывает 1275 анализов, что является наиболее полной сводкой по данной территории. Кроме стандартного набора петрогенных окислов, каждый образец охарактеризован петрографически. Анализы выполнялись по методикам стандартного силикатного анализа (ССА) и рентгенофлуоресцентного анализа (РФА).

Таким образом, имеются три базы данных: общая база (16827 образцов); петромагнитная база данных (709 образцов) и петрохимическая база данных (1275 образцов). Каждый из образцов охарактеризован по петрографической принадлежности, имеет координаты точки отбора. Между всеми базами имеются пересекающиеся выборки образцов. Пересечением всех трех баз является выборка из 147 образцов. Пересекающаяся выборка между общей базой и петромагнитной базой составляет 709 образцов. Между общей базой и петрохимической базой пересекающаяся выборка составляет 501 образец.

Выбрана следующая последовательность построения петромагнитной модели пород трапповой формации северо-востока Тунгусской синеклизы с использованием подготовленных баз:

1. Независимый статистический анализ петрохимической и петромагнитной баз данных, выявление закономерностей распределения петромагнитных и петрохимических параметров с обоснованным выделением групп траппов по каждой базе, сопоставление результатов статистической обработки обеих баз данных на пересекающихся образцах.
2. Анализ совпадений и отклонений результатов совместной обработки петромагнитных и петрохимических баз.
3. Сопоставление выводов по петромагнитной базе с независимой статистической обработкой общей базы данных.
4. Оценка возможности применения полученной петромагнитной модели. На нескольких примерах проиллюстрировать применение полученной петромагнитной модели для решения конкретных геолого-геофизических задач.

Многообразие трапповых пород определяется переплетением множества разнонаправленных и разновременных физико-геологических процессов и условий, ни один из которых практически нельзя выделить и наблюдать в чистом виде или точно описать с помощью функций, имеющих вид закона. Во всех случаях мы вынуждены иметь дело лишь с при-

ближенными оценками размаха и направленности этих процессов. То есть исследуемое сообщество пород трапповой формации является открытой, низкоорганизованной диффузной системой с широкими границами конвергентности в любом изучаемом аспекте.

Использование в этом случае заранее детерминированных моделей может привести к ошибочным выводам. Более эффективным представляется использование для анализа собранных данных методов многомерной статистики с целью выделения и оценки основных тенденций. Это дает возможность использовать большое число объектов и их характеристик для устойчивого выявления возможных внутренних причинно-следственных взаимосвязей и принципов их классификации. Применение этих методов для каждой базы имеет свои особенности (граф обработки), которые будут рассмотрены при описании результатов.

Многомерные статистические методы, предлагаемые для анализа подготовленных баз данных, представлены методами факторного, кластерного и дискриминантного анализа. Поскольку использованию многомерных статистических процедур в геологии посвящено достаточно много работ, рассмотрены лишь вопросы подготовки баз данных к анализу. Обоснован выбор тех или иных процедур многомерных статистических методов и отражены наиболее существенные их моменты, учет которых необходим при анализе имеющихся данных. Все процедуры многомерного статистического анализа выполнялись в пакете программ «Statistica 5.0».

В третьей главе приводятся результаты статистической обработки баз данных по методике, описанной выше.

Петромагнитная база данных. Распределение большинства петромагнитных характеристик (Is , Irs , In , α , Hc , Hcr , Hcr/Hc , Q) близко к логнормальному, поэтому в процедурах статистического анализа использованы логарифмы этих величин. Остальные параметры (Irs/Is , $fon1$, $fon2$ и др.) имеют явно выраженные полимодальные распределения - причиной этого, вероятно, является наличие групп траппов, имеющих существенно отличные характеристики ферромагнитной составляющей породы. Наиболее резко отличаются по всем петромагнитным характеристикам микродолериты. Для них характерно практически однодоменное состояние магнитной фракции при очень низкой её концентрации. Резкое отличие этих пород позволяет сразу выделить их в отдельную группу.

Перед началом выполнения факторного анализа (ФА) анализировалась корреляционная матрица выбранных петромагнитных характеристик, были исключены как избыточные некоторые параметры, так как их дисперсии хорошо согласуются с дисперсиями других параметров. Определитель корреляционной матрицы без этих параметров значимо отличен от нуля и оставшиеся параметры могут быть использованы в ФА, задачей которой являлось разделение петромагнитных характеристик по латентным факторам с определением

значимости нагрузок и приведение шкал изменения параметров к единому масштабу. Было получено 11 факторов, после минимизации их числа выделено 7 значимых факторов, сумма воспроизводимой дисперсии которых составляет 96,14% от общей дисперсии.

После вращения варимакс образовалось две группы факторов, значительно различающихся по доле общей дисперсии. В первую группу входят первые три фактора, которые определяют 62,67% общей дисперсии и характеризуют в порядке убывания основные латентные источники изменчивости петромагнитных характеристик – концентрацию ферромагнитных минералов (χ и I_s), их доменную структуру (H_c и H_{c1}/H_c) и магнитное состояние (I_n и Q). Остальные 4 фактора имеют практически равный вес и определяют 33,47% общей дисперсии и характеризуют менее проявленные и слабоизученные латентные источники изменчивости – парамагнитный фон магнитных и породообразующих минералов, структуру зерен минералов и т.п.

Одновременное использование факторов обоих типов в процедурах классификации трапповых пород, в том числе кластерного анализа (КА), нецелесообразно, так как даже в случае учета их веса, следует ожидать появление небольших групп образцов, целиком обусловленных влиянием только одного из факторов (доминантного). При этом факторное пространство искажается, выделение отдельных групп и их границ становится неустойчивым. Предложен и реализован следующий вариант решения данной проблемы: выделяются отдельные группы или части групп (сообщества) образцов трапповых пород, для которых доминантными являются факторы второго типа; эти образцы и определяющие их доминантные факторы исключаются из исследуемой выборки, что приводит к упрощению факторного пространства для оставшихся образцов; выполняется группирование оставшейся выборки иерархическим кластерным анализом образцов по факторам первого типа. Наиболее устойчивый результат методы КА дают при делении оставшейся выборки на 3 группы. В этом случае итоги группирования не зависят от используемого вида алгоритма.

Для выделенных 4-х групп (включая микродолериты) вычислены значения критерия Стьюдента по всем параметрам с уровнем значимости $P=0.05$ и установлено по ним наличие значимых различий для всех групп. Для выделенных кластерным анализом первых трех групп образцов трапповых пород были получены функции классификации с использованием метода дискриминантного анализа (ДА). Наиболее значимыми магнитными характеристиками для нахождения этих функций является магнитная восприимчивость χ , коэрцитивная сила H_c , фактор Кенисбергера Q , отношение H_{c1}/H_c , магнитная стабильность I_n/I_n и намагниченность насыщения I_s . Эти параметры обеспечивают правильную классификацию для 98,03% выборки.

Петрохимическая база данных. Для минимизации искажений в последующих статис-

тических расчетах были отбракованы анализы, для которых сумма окислов находилась вне интервала [98,5–101%], а также анализы, содержащие петрогенные окислы с явными выбросами значений (более $\pm 4\sigma$). Для ослабления влияния замкнутости системы петрогенных окислов и уменьшения искажений истинных корреляционных связей между породообразующими элементами (согласно теореме Вистелиуса-Сарманова) произведен пересчет содержаний петрогенных элементов путем деления на сумму кислорода. Это позволяет с большей обоснованностью применять многомерные статистические методы, использующие корреляционные и ковариационные матрицы.

Большинство петрогенных элементов характеризуются распределениями, заметно отличающимися от нормальных. Даже в относительно хорошо вписывающихся в общий ход нормальной кривой распределениях Fe^{2+} , Mg, Ca, Mn имеются в разной степени выраженные локальные моды, существенно искажающие распределения этих элементов. Наиболее однородное распределение имеет Al, но его эксцесс и размах значительно отличаются от нормального, что означает наличие значительных случайных вариаций содержаний Al. Распределение калия близко к логнормальному закону, а распределения Si, Ti, Fe^{3+} , SFe, Na, P имеют выраженный полимодальный характер. Несомненно, что имеющаяся петрохимическая выборка не является однородной и содержит несколько групп траппов, различающихся между собой по содержаниям петрогенных элементов. Эти группы неодинаково выделяются по разным петрогенным элементам, имеют по ним существенно отличающиеся статистические характеристики рассеяния и являются конвергентными в достаточно широких пределах, что крайне затрудняет их разделение.

По этой причине применение многомерных статистических процедур для прямого разделения данной выборки не даст однозначного результата, поэтому предлагается провести последовательное выделение и исключение отдельных групп, заметно отличающихся от основной выборки. Это дает возможность варьировать параметры и условия выделения отдельных групп, а также исключение каждой из выделяемых групп будет снижать влияние сильно дифференцированных петрогенных элементов. Данная задача решается многократным применением цепочки процедур многомерного статистического анализа:

- факторного анализа с вращением эквимакс, обеспечивающего как некоторое сокращение числа значимых факторов, так и равномерную нагрузку на оставшиеся;
- выделение двух групп методом кластерного анализа K-средних с алгоритмом, обеспечивающем максимальное расстояние между центрами кластеров (т.е. обеспечивающем отделение от основной выборки наиболее удаленного кластера);
- дискриминантного анализа с нахождением функций классификации и последующим уточнением на их основе принадлежности конкретных анализов к выделенным кластерам.

После выделения и исключения обособившейся группы, цепочка процедур повторяется для оставшейся части выборки.

После применения трех циклов данной процедуры вся петрохимическая база данных была последовательно разделена на 4 группы с вероятностью не менее 0.95:

1. Трапповые породы с повышенным содержанием K, Si и щелочей в целом (164 анализа). Наиболее контрастные факторы, определяющие обособление «калиевых» траппов в многомерном пространстве определяются вариациями содержания K, Ti, Fe^{3+} и Ca.
2. Трапповые породы с повышенным содержанием Ti, Fe^{2+} и P (134 анализа). Наиболее важные факторы, локализирующие эту группу «высокотитановых» траппов, определяются изменчивостью Ti, Fe^{2+} , Na, Ca, Si и P.
3. Трапповые породы, практически идентичные по химическому составу т.н. «среднему» траппу Тунгусской синеклизы. Данная группа трапповых пород характеризуется максимальными содержаниями Fe^{3+} и повышенными содержаниями Ti на фоне оставшейся части выборки (211 анализов).
4. Трапповые породы с минимальными содержаниями Ti, Fe^{2+} и P и максимальными значениями содержаний Al, Mg и Ca, то есть являющиеся наиболее «основными». Эта группа является неоднородной и с вероятностью порядка 0.75 разделяется на две подгруппы. Эти подгруппы очень контрастно различаются по отношению между Fe^{2+} и Fe^{3+} или так называемому коэффициенту окисленности железа Kf (327 анализов).

Каждая из этих четырех групп представлена сотнями химических анализов, что дало возможность уверенно определить средние содержания петрогенных окислов для них и построить соответствующие классификационные уравнения для определения принадлежности траппов (в т.ч. по вновь получаемым анализам) со средней вероятностью $P = 0.925$.

Сопоставление полученных петромагнитных и петрохимических групп выполнено на выборке трапповых пород, пересекающейся между петромагнитной и петрохимической базами (147 образцов). Ввиду относительно небольшого количества образцов трапповых пород сопоставление статистических результатов группирования носит оценочный характер. Из проведенного сопоставления можно отметить следующее:

- наблюдается хорошее соответствие средних петрохимических и петромагнитных параметров 1-й петромагнитной группы и 3-й петрохимической группы («средние» траппы);
- уверенно сопоставляются средние петромагнитные и петрохимические параметры 2-й петромагнитной группы и 1-й петрохимической группы («калиевые» траппы);
- отмечается сходство средних петромагнитных и петрохимических параметров 3-й петромагнитной группы и 4-й петрохимической группы («основные» траппы);
- средние петрохимические и петромагнитные параметры 4-й петромагнитной группы

(микродолериты) не имеют каких либо соответствий среди петрохимических групп, а входящие в неё образцы большей частью сосредоточены в 4-й петрохимической группе; - вторая петрохимическая группа («высокотитановые» траппы) слабо представлена петромагнитными измерениями (5 обр.), т.е. выборка не представительна.

Таким образом, можно говорить о наличии определенного соответствия между петромагнитными и петрохимическими группами. Это дает возможность выделить обобщенные группы траппов (OIT), обладающие и петромагнитными и петрохимическими атрибутивными параметрами. Всего, по данным совместного анализа петрохимических и петромагнитных данных выделяется не менее пяти обобщенных групп трапповых пород, включая микродолериты.

Для использования полученных результатов при анализе общей базы данных определены функции классификации для обобщенных групп траппов по σ , α и In, имеющие общую вероятность правильной классификации $P = 0.8916$.

Общая база данных. База общих (интегральных) физических свойств (σ , α , In и Q) трапповых пород исследуемой площади является наиболее представительной из имеющихся в распоряжении автора и содержит 16827 образцов. С целью уменьшения объектов группирования из неё были выделены контрастно отличающиеся группы и выборки пород: группа туфовых пород (430 обр.); группа микродолеритов (1166 обр.); выборка контактово-измененных, гидротермально-измененных, гибридных и прочих экзотических трапповых пород (1044 обр.); выборка пород с экстремальными (более $\pm 4\sigma$) значениями параметров (471 обр.). Также выделены в отдельную выборку сильновыветрелые образцы (3650 обр.). Оставшиеся 10066 образцов разделены на контрольную (1021 обр.) и анализируемую (9045 обр.) выборки.

Анализ характеристик распределений показывает, что наиболее близким к нормальному является распределение плотности. Распределения α , In и фактора Q близки к лог-нормальному распределению. Факторный анализ, ввиду низкой корреляции между основными параметрами, не может дать каких-либо значимых результатов, поэтому было решено выполнить кластерный анализ, позволяющий упорядочить имеющуюся выборку в сравнительно однородные группы. Во избежание детерминированности результатов, ранее полученные функции классификации на этом этапе не применялись.

Использование КА для подобных выборок также представляет определенные трудности по следующим причинам:

1. Исходя из характеристик распределения физических свойств, следует ожидать наличия достаточно значительного количества образцов с промежуточными значениями параметров, однозначно не относимыми ни к одной из групп и образующих области смешения

(конвергенции) между разными группами пород.

2. Хотя цель кластеризации и заключается в нахождении структуры данных, в данном случае и сам кластерный анализ может привести структуру в данные и эта структура может не совпадать с искомой (т.е. истинной).

3. Кластерный анализ размещает объекты по группам, которые могут радикально различаться по составу при высокой конвергентности выборки, если применяются различные методы кластеризации или различные наборы данных и число искомых кластеров.

4. В процедурах кластерного анализа используются значения плотности, σ и I_n образцов, т.е. количество характеристик для кластеризации крайне ограничено.

Для ослабления действия осложняющих факторов было решено выполнить кластерный анализ с различными наборами параметров: 1) σ , α , I_n ; 2) σ и Q ; 3) σ и α ; 4) σ и I_n ; 5) α и I_n с различным числом выделяемых кластеров (от 3 до 9). При этом логично ожидать, что образцы, действительно представляющие устойчивые группы трапповых пород, будут выделяться при любых вариантах кластеризации, а часть образцов, не имеющих устойчивой принадлежности к этим группам, будут образовывать переходные сообщества. Таким образом, было выделено 12 групп трапповых пород, при этом только в двух содержится чуть менее 100 образцов, остальные же весьма представительные, а три из них насчитывают свыше 1000 образцов каждая. По этим группам распределилось 8191 образец траппов из 9045 (или 90,56%), имеющих в анализируемой выборке. Остальные 854 образца (9,44% выборки) распределены в мелких группах с числом образцов от 1 до 22 и могут быть определены как образцы траппов с промежуточными (конвергентными) значениями физических параметров и выделены в отдельную выборку. Устойчивость достигнутого разделения трапповых пород на 12 групп была проверена нахождением функций классификации с ее апробированием на контрольной выборке.

Полученные с использованием дискриминантного анализа функции классификации обеспечивают правильное отнесение образцов в 90,62% случаев, что указывает на наличие в выборке какого-то количества (9,38%) образцов с конвергентными характеристиками. Несмотря на то, что примерно такое же количество уже было исключено из анализируемой выборки по результатам кластерного анализа. Проверка полученных функций классификации на контрольной выборке дает оценку вероятности однозначной классификации на уровне $P = 0.72$ для 81,9% образцов, еще 11,2% образцов классифицируются с вероятностью в пределах 0,52-0,72 и 6,9% образцов классифицируются с вероятностью ниже 0,52.

Таким образом, примерно 19-20% образцов трапповых пород исследуемой территории по набору из трех характеристик физических свойств (σ , α и I_n) не имеют однозначной принадлежности и именно они, создавая значительное множество мелких

переходных групп, маскируют существование отдельных петрофизических групп траппов, создавая иллюзию полной конвергентности трапповых пород по этим свойствам.

Обоснованный переход на более высокий уровень объединения полученных групп трапповых пород возможен лишь с привлечением результатов совместного анализа петромагнитных и петрохимических данных. С использованием методов иерархического кластерного анализа был получен вариант объединения трапповых пород до 6 групп, дающий хорошее соответствие с выделенными ранее обобщенными группами траппов (ОГТ). При этом 1, 2 и 4 ОГТ имеют прямые аналоги, а третьей ОГТ, в полученном объединении, соответствует две группы (3 и 5). Кроме этого, выделяется небольшая шестая группа (427 обр.), не имеющая прямых соответствий с имеющимися обобщенными группами траппов. Появление новых групп траппов при анализе общей базы, наиболее представительной из имеющихся, не опровергает ранее сделанные выводы, а лишь подчеркивает недостаточную изученность траппов петрохимическими и петромагнитными методами.

Для данного варианта объединения построены функции классификации, позволяющие с вероятностью на уровне $P = 0.9$ производить классификацию трапповых пород по σ , α и I_n . Применение полученных функций классификации к базовой выборке (13716 образцов), содержащей все образцы интрузивных траппов, пригодных для обработки, позволило получить для них индексы принадлежности к выделенным группам и определить для них средние значения физических параметров. Значения параметров по выделенным группам представлены в таблице 1.

Для обеспечения анализа площадного распространения траппов в этой таблице также приведены средние значения физических свойств микродолеритов и туфов. Трапповые породы, петрографически определяемые как микродолериты (1166 образцов), имеют разный генезис. Среди них выделяются:

- магнитные микродолериты эндоконтактов интрузивных трапповых тел ($\sigma=2,835 \cdot 10^3$ кг/м³; $\alpha=881 \cdot 10^{-6}$ ед. СИ; $I_n=1618 \cdot 10^3$ А/м; $Q=3,048$ отн. ед.), не имеющие самостоятельного значения;
- слабомагнитные микродолериты, полностью слагающие мелкие штоки и дайки, и выделяемые в отдельную, 7 группу трапповых пород.

Таблица 1

Номер группы	Кол-во образцов	Плотность σ , 10^3 кг/м^3	α , 10^{-6} ед. СИ	I_n , 10^{-3} А/м	Q	Знак I_n
1	5386	2.941	945.6	8294.9	14.62	+
2	552	2.919	222.5	832.4	4.74	+
3	2017	2.820	738.9	1395.7	3.15	\pm
4	2638	2.965	1151.2	825.8	1.20	-
5	1933	2.915	1316.3	3152.6	3.99	\pm
6	590	2.949	836.7	2586.5	5.15	+
7	729	2.867	74.8	238.2	5.08	-
8-0	30	2.106	<35	<15	<1.00	+
8-1	204	2.203	55.1	172.0	4.84	+
8-2	118	2.248	221.3	623.7	4.89	\pm
8-3	78	2.361	990.8	3054.9	5.13	\pm

Среди туфов, составляющих 8. наименее изученную группу пород трапповой формации (430 образцов со средними: $\sigma=2,218 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; $\alpha=105 \cdot 10^{-6} \text{ ед. СИ}$; $I_n=310 \cdot 10^{-3} \text{ А/м}$; $Q=4,93$), выделяются четыре различающихся между собой, подгруппы пород:

- практически немагнитные породы с преобладанием терригенного материала: туфоалевролиты, туфопесчаники, туфоконгломераты, туффиты (8-0);
- слабомагнитные породы с преобладанием пирокластического материала: туфы, пирокластиты (8-1);
- магнитные породы: туфы взрывные и ксенотуфы (8-2);
- высокомагнитные интрузивные туфы (туффиты) и кластолавы (8-3).

Таким образом, при анализе общей базы установлено, что наличие сведений о плотности σ , магнитной восприимчивости α и I_n траппов дает возможность при помощи методов многомерного статистического анализа проводить разделение интрузивных трапповых пород на петрофизические группы с вероятностью на уровне $P \approx 0.8$. При этом без привлечения данных других аналитических методов затруднительно осуществить переход от выделенных петрофизических групп к геолого-генетическим разновидностям трапповых пород, за исключением контрастно отличающихся групп микродемитов и туфов. В целях повышения устойчивости и надежности классификации траппов необходимо дополнение существующего набора измеряемых физических характеристик (σ , α , I_n) новыми параметрами, легко получаемыми в массовом порядке и не имеющими тесных корреляционных связей с вышеуказанными параметрами.

В четвертой главе описана петромагнитная модель трапповых пород северо-востока Тунгусской синеклизы и показана на конкретных примерах возможность её применения для районирования и интерпретации геофизических полей.

На основании качественного совместного анализа накопленных геологических наблюдений, петрографических описаний, петрохимических и петрофизических данных, а также применения описанных выше статистических процедур, предложена петромагнитная модель трапповых пород северо-востока Тунгусской синеклизы. Установлено, что пермотриасовые траппы района могут быть разделены как минимум на три фазы внедрения, имеющих различия как по петрогеохимическим, так и по петрофизическим характеристикам. В трапповой формации исследуемой территории выделяются:

1 фаза (интрузивно-субвулканическая), $\nu\beta_1-\beta_0P_2$. Представлена на изучаемой площади четырьмя фациями трапповых пород:

- туфовой (Табл. 1, группы 8-0 и 8-1);
- недифференцированных пластовых и секущих интрузий (Табл. 1, группа 1);
- дифференцированных пластовых интрузий (Табл. 1, группа 2);
- фацией, объединяющей даечные тела (подводящие каналы) и глубинные (залегающие среди карбонатных пород) маломощные пластовые интрузии (Табл. 1, группа 6).

Породы туфовой фации развиты ограниченно, в унаследованных понижениях рельефа, перекрывают терригенные породы пермо-карбона и интрузивные образования, петромагнитными методами не изучались и даже их интегральные магнитные характеристики слабо изучены. По содержанию окиси титана, щелочей и других петрогенных компонентов они близки к «средним» траппам.

Фация недифференцированных трапповых пластовых и секущих интрузий различной мощности повсеместно развита на исследуемой территории в виде многоступенчатых трапповых силлов, встречающихся как на современной дневной поверхности, так и на различных глубинах в толще терригенно-карбонатных пород. По составу соответствуют «среднему» траппу. Отличительной характеристикой траппов этой фации является очень высокая остаточная намагниченность положительного знака, достигающая 9000 мА/м и более. При анализе образцов этих траппов со структурами спиноподобного распада титаномagnetитов установлено, что расчетное время остывания этих интрузий от температур Кюри до температуры закалки составляет первые сутки и десятки суток, что соответствует представлениям о приповерхностном режиме их формирования.

Фация дифференцированных пластовых интрузий развита ограниченно и картируется в современном рельефе в основном на высоких водоразделах среди терригенных пород пермо-карбона. По химическому составу соответствует «калиевым» траппам. α и I_n этих

траппов очень низкие. Характер изменчивости магнитных свойств дифференцированных интрузий крайне сложен как в разрезе, так и по их латерали и как следствие – сложный характер проявления в магнитном поле, которое над этими интрузиями имеет знакопеременный (вплоть до появления аномалий отрицательного знака) мозаичный характер и пониженную интенсивность.

Фация трапповых пород, представляющая даечные тела и протяженные маломощные недифференцированные силлы, залегающие в толще карбонатных пород, выделена в ходе анализа общей базы и в целом изучена слабо. Анализ структур распада титаномagnetитов единичных образцов, попавших на петромагнитные исследования, прежде всего, отмечает медленное остывание (первые десятки лет) этих пород, что обусловило хорошую раскристаллизованность пород и достаточно высокую их однородность. В магнитном поле выражаются протяженными положительными аномалиями, интерпретируемыми как субвертикальные маломощные пластовые тела (дайки).

II фаза (вулcano-субинтрузивная). β_1 - $\nu\beta$; P_2 - T_1 . Включает широкую гамму комагматичных трапповых пород и представлена как минимум пятью фациями:

- туфовой (Табл. 1, группа 8-2);
- туффизитовой (Табл. 1, группа 8-3);
- жерловой или бескорневых вулканов (Табл. 1, группа 7);
- субинтрузивной или долерит-туффизитовой (Табл. 1, группа 3);
- интрузивной (Табл. 1, группа 5).

Все эти разнообразные фации составляют единый комагматичный эффузивно-интрузивный комплекс с достаточно выдержанными петрохимическими характеристиками, соответствующими «основным» траппам. Специфические особенности фациального многообразия и изменчивости траппов второй фазы внедрения во многом определены высокой насыщенностью магматического расплава газо-флюидной компонентой, его низкой вязкостью и геолого-динамическими особенностями внедрения.

Этот комплекс трапповых пород характеризуется неоднозначным характером изменчивости направления и модуля вектора ЕОН. В его составе отмечаются как положительно намагниченные траппы с высокой ЕОН, так и базиты с нестабильным (\pm) знаком и низкой ЕОН, а в редких случаях – отрицательно намагниченные с высокими значениями ЕОН. Часто единые по геологическим и петрографическим данным тела траппов в разных своих частях резко различаются по величине и направлению ЕОН.

Породы туфовой фации формировались в результате деятельности небольших вулканических аппаратов, возникавших над внедряющимися интрузиями. Они поставляли пирокластику на дневную поверхность с образованием насыпных взрывных туфов. От

туфов первой фазы внедрения они отличаются полным отсутствием сортировки и окатанности материала, а также более высокой магнитностью (α и ЕОН) и плотностью.

Туффизитовая фация представлена крупнообломочными туфами и эруптивными брекчиями (туфобрекчиями). Часто отмечаются постепенные переходы к субинтрузивным разностям траппов, с которыми они имеют и сходные интегральные магнитные свойства, но резко отличаются по плотности. Единичные образцы туффизитов, которые были исследованы петромагнитными методами, отличаются от интрузивных разностей траппов очень низкими значениями $I_{rs} < 25$ А/м.

Фация бескорневых вулканов (жерловая) представлена гаммой трапповых пород, петрографически определяемых как микродолериты, реже – как кластолавы. Развита ограниченно, в пределах полей развития интрузий второй фазы внедрения и туффизитовых толщ. По магнитным свойствам породы данной фации отличаются кардинальным образом не только от комагматичных им пород второй фазы, но и от всех других обнаруженных разностей трапповых пород. Их специфические условия образования предопределили существование титаномagnetитов в виде мелких зерен и в очень незначительном количестве. Это обуславливает выраженное однодомное состояние магнитной матрицы этих пород и аномально низкую (для траппов) намагниченность.

Субинтрузивная фация второй фазы внедрения развита совместно с туффизитами, слагая нижние части единых долерит-туффизитовых построек. Они интродуцируют терригенные отложения, а во многих случаях в результате эрозии выведены на дневную поверхность. По средним магнитным характеристикам эти породы заметно отличаются от интрузивных разностей траппов других фаз внедрения, но обладают значительной изменчивостью по большинству из них. Их также отличает заметно пониженная плотность. Аномальное магнитное поле над этими интрузиями имеет сложный знакопеременный пилообразный характер, тем самым, отражая спектр изменчивости петромагнитных свойств.

Интрузивная фация второй фазы внедрения развита повсеместно и представлена пластовыми и секущими интрузиями, преимущественно локализующимися на границе раздела терригенных и карбонатных пород и реже – в терригенных породах. Силлы этой фации были вязкими и очень чутко реагировали на любые неровности рельефа нижнепалеозойского кимберлитовмещающего основания, в том числе структуры диатремовой ассоциации, как бы обтекая их, вследствие чего образуют многочисленные безтрапповые «окна» и «коридоры». Исходя из этого, корректное выделение интрузий второй фазы при проведении поисковых работ на алмазы имеет важное практическое значение. Они заметно отличаются от тел субинтрузивной фации повышенной α и ЕОН, а также плотностью. По химическому составу интрузивные и субинтрузивные тела разделяются, в основном, по

коэффициенту окисленности железа. Субинтрузивные тела характеризуются низкими его значениями. Петромагнитных данных для четкого количественного разделения этих интрузий на сегодня недостаточно и необходимо продолжить петромагнитные исследования данных фациальных разностей трапповых пород.

III фаза (интрузивная), $v\beta_3T_1(?)$. Представлена одной, интрузивной фацией (Табл. 1, группа 4).

Пластовые и секущие интрузии этой фазы залегают преимущественно среди пород палеозойского карбонатного комплекса, иногда выходят на гипсометрические уровни первой и второй фаз. Содержат многочисленные блоки отторженцев карбонатных и терригенных пород, а иногда – и кимберлитов, образуют инъективные поднятия, прорывают субвулканические и интрузивные тела второй фазы. Интрузивные тела часто имеют признаки дифференциации, степень которой обычно возрастает с увеличением мощности тела. По химическому составу соответствуют «высокотитановым» траппам.

Преимущественное распространение этих интрузий в нижней части траппового комплекса обусловило их достаточно слабую изученность петромагнитными методами. Оценочные значения петромагнитных характеристик определены лишь по небольшому количеству образцов и нуждаются в уточнении. По интегральным параметрам трапповые породы этой фазы заметно отличаются от остальных интрузивных траппов повышенной ЕОН, плотностью и низкими значениями фактора Кенисбергера. Главной отличительной особенностью трапповых пород этой фазы является четко проявленное отрицательное направление вектора ЕОН. Вероятно, что формирование этих интрузий происходило спустя значительное время после внедрения интрузий второй фазы, при изменившемся направлении древнего геомагнитного поля. Повышенная α при низкой ЕОН, преимущественно многодоменное состояние носителей намагниченности, свидетельствуют о формировании достаточно крупных однородных зерен титаномagnetитов в условиях медленного равномерного остывания интрузии. Над интрузиями третьей фазы внедрения фиксируются слабоинтенсивные отрицательные (редко – положительные) аномалии магнитного поля интенсивностью до 150-300 нТл.

В качестве примера применения петромагнитной модели трапповых пород были рассмотрены варианты площадной и профильной интерпретации потенциальных полей с использованием атрибутов предложенной модели.

Для площадного варианта была использована изданная по результатам АМС-25 сводная карта аномального магнитного поля ΔT_a м-ба 1:200000, охватывающая юго-запад Алакит-Мархинского кимберлитового поля и междуречье рек Алакит, Марха и Моркока. С использованием блока «Таксономия» интегрированной системы «Пангея» проведено

площадное расчленение траппового комплекса согласно полученной модели по полю ΔT_a . Основой алгоритма данной программы является установление корреляции между характеристиками геофизического поля на площади и некоторыми объектами (таксонами) с априорно известными атрибутами, имеющими точки локализации на этой же площади.

В качестве характеристик аномального магнитного поля использовались его средние значения, дисперсия, эксцесс, асимметрия, горизонтальный и вертикальный градиенты. Магнитные свойства таксонов (α , I_p и Q) были определены из имеющейся петромагнитной модели трапповой формации и магнитных свойств терригенных и карбонатных пород. Первые пять групп (Таблица 1) трапповых пород, имеющих площадное распространение, были приняты за отдельные таксоны с соответствующими этим группам магнитными параметрами. Долерит-туффизитовые постройки второй фазы внедрения, сложенные субинтрузивной и туффизитовой фациями выделены в отдельный, шестой таксон, с параметрами, средними между группой 3 и подгруппой 8-3 (Таблица 1). Слабомагнитные туфовые породы (подгруппы 8-1, 8-2) и терригенные породы пермо-карбона, учитывая близость их магнитных параметров (при данном масштабе) объединены в 7-й таксон. Немагнитные карбонатные породы выделены в качестве 8 таксона.

В результате выполненного анализа было установлено закономерное площадное распространение выделенных таксонов, хорошо коррелируемое с имеющимися геологическими данными. Кроме этого, во многих случаях удается проследить распространение интрузий различных фаз внедрения в толще терригенных и карбонатных пород, где они не были зафиксированы при геологической съемке с дневной поверхности.

Для демонстрации возможностей интерпретации потенциальных полей в двумерном варианте с использованием петромагнитной модели был выбран профиль через участок тр. Кыллахская, полученный в ходе магнитной и гравиметрической съемки м-ба 1:5000 с шагом 25 м. Поисковое бурение здесь выполнялось без отбора керна траппов, геологическое описание траппового комплекса отсутствует. По данным геофизического исследования скважин (ГИС) методами каротажа магнитной восприимчивости и скважинной магнитометрии регистрируется значительная изменчивость по MV и амплитуды T -поля и предполагается наличие не менее 3-4 пластовых разностей трапповых пород. Попытки моделировать данные гравиразведки также указали на вероятное наличие трапповых пород с различной плотностью. Автоматизированный перебор магнитных и плотностных параметров ввиду очень широких пределов эквивалентности, не позволил получить оптимальной модели, соответствующей реальному разрезу и данным ГИС.

Из петромагнитной модели трапповых пород следует, что если данный трапповый комплекс сложен различными фациальными разностями, то между ними должны

существовать выдержанные межфациальные магнитные, а в ряде случаев – и плотностные границы. Их выделение можно произвести с помощью программ, реализующих алгоритмы метода особых точек (ОТ), характеризующихся рядом параметров (мощностью источника, порядками полюса и производной, высота пересчёта и т.д.).

После расчета координат и параметров ОТ внутри траппового комплекса появляется возможность (прослеживая однотипные ОТ) трассировать границы тел с разными физическими параметрами. Сопоставление с данными КМВ дает отклонения этих границ не более 5 м, а верхние и нижние кройки траппового комплекса хорошо совпадают с данными бурения. В итоге получаем своеобразный «каркас» структуры траппового комплекса.

Используя полученные границы, магнитные и плотностные свойства трапповых фаций в качестве фиксированных в программах моделирования («GM-SYS» и т.п.), можно успешно решить прямую задачу. Детерминирование границ, магнитных и плотностных атрибутов трапповых фаций позволяет резко сократить число итераций, сузить пределы эквивалентности и повысить однозначность решения прямой задачи. Точный учет влияния траппового комплекса в свою очередь позволяет выделить эффекты от аномальных объектов, находящихся в толще карбонатных пород, в том числе от кимберлитовых тел.

Таким образом, полученная петромагнитная модель трапповой формации исследуемой территории может быть использована на различных этапах интерпретации потенциальных геофизических полей.

Заключение.

В итоге выполненных исследований и обобщения накопленного к настоящему времени экспериментального материала по магнитным свойствам и химизму трапповых пород северо-востока Тунгусской синеклизы были получены следующие результаты:

1. Создана наиболее полная на сегодняшний день экспериментальная база данных по породам трапповой формации северо-востока Тунгусской синеклизы, включающая:
 - общую базу, куда входят измерения интегральных магнитных параметров и плотности по 16827 образцам;
 - базу результатов детальных петромагнитных исследований траппов по 709 образцам;
 - петрохимическую базу, содержащую 1275 силикатных анализов трапповых пород.
2. При использовании методов многомерного статистического анализа (факторного, кластерного и дискриминантного анализов) достоверно выделяются группы образцов трапповых пород, существенно отличающиеся между собой по большинству из использованных петромагнитных характеристик. Для определения этих групп получены устойчивые функции классификации, позволяющие с высокой степенью вероятности (не

менее 98%) классифицировать все имеющиеся и вновь исследуемые образцы трапповых пород по комплексу петромагнитных характеристик. Наиболее эффективными для классификации трапповых пород петромагнитными характеристиками являются: магнитная восприимчивость χ , намагниченность насыщения I_s , фактор Кенисбергера Q , магнитная стабильность ln_r/ln , коэрцитивная сила H_c и отношение H_{cg}/H_c .

4. Доменная структура ферромагнитной фракции трапповых пород, наряду с χ и ln , является определяющим фактором состояния магнитной матрицы породы. Исходя из этого, массовое изучение трапповых пород должно быть, дополнено методами, позволяющими получить достоверные значения параметров, характеризующих доменную структуру ферромагнитной фракции (H_c , H_{cg} и т.п.).

5. В результате сопоставления групп трапповых пород, выделенных при анализе петромагнитной и петрохимической баз данных, установлено:

- соответствие между большинством петромагнитных и петрохимических групп, указывающее на существование разновидностей трапповых пород, характеризующихся закономерным изменением, как химического состава, так и петромагнитных характеристик;
- отличия характеристик петромагнитных и петрохимических групп траппов связаны как с различным влиянием петрогенных окислов, так и с большим влиянием условий образования на физические свойства породы;
- существуют отдельные петрографические разновидности траппов, которые выделяются только по петромагнитным параметрам. Для этих пород определяющим является не химический состав, а термодинамические условия их формирования, отражающиеся в их магнитном состоянии. В этом плане использование петромагнитных характеристик увеличивает возможности аналитических методов классификации траппов;
- по данным статистического анализа петрохимических и петромагнитных анализов и их сопоставления выделяется не менее пяти обобщенных групп трапповых пород.

6. В результате анализа наиболее представительной, общей базы данных, и сопоставления с данными анализа петромагнитной и петрохимической баз, установлено:

- распределения интегральных физических свойств (σ , χ и EON) трапповых пород значительно отличаются от нормального или логнормального. В общей их совокупности существуют отдельные группы трапповых пород, имеющие устойчивые сочетания этих физических характеристик;
- при помощи методов многомерного статистического анализа проведено (на уровне $P \approx 0.8$) разделение интрузивных трапповых пород на петрофизические группы по интегральным параметрам, около 20% образцов трапповых пород исследуемой территории по данному набору физических характеристик не имеют однозначной принадлежности;

- выделено шесть групп интрузивных траппов, пять из которых коррелируется с группами, выделенными по данным петромагнитных и петрохимических исследований, определены функции классификации для этих групп.

7. Разработаны для практического применения и апробированы на фактическом материале графы обработки и классификации трапповых пород по совокупностям петромагнитных характеристик, петрогенных окислов и интегральных физических параметров (плотности, α и ЕОН).

8. Выделенные группы траппов могут быть успешно использованы при построении региональной схемы классификации трапповых пород. Совместное использование петромагнитных и петрохимических данных существенным образом повышает надежность решения классификационных задач для близкородственных групп трапповых пород.

9. Использование полученных петромагнитных и плотностных характеристик групп трапповых пород в современных компьютерных интегрированных системах интерпретации геофизических полей позволяет выполнять площадное изучение структуры траппового комплекса. При детальной интерпретации и моделировании потенциальных полей на траппонасыщенных участках использование полученных данных существенно повышает достоверность результатов и сокращает время на их получение.

Основные результаты опубликованы в следующих работах:

А. Опубликованные в открытой печати.

1. Ибрагимов Ш.З., Мишенин С.Г. Оценка скорости остывания трапповых силлов на основе данных о структурах распада титаномagnetитов // Проблемы геологии и металлогении северо-востока Азии на рубеже тысячелетий. Билибинские чтения. Т.1. Магадан. 2001. С.150-152.

2. Мишенин С.Г., Зинчук Н.Н., Бондаренко А.Т. Петрофизические параметры кимберлитов, траппов и осадочных горных пород Далдыно-Алакитского района Якутии // Проблемы алмазной геологии и некоторые пути их решения. Воронеж: Воронежский госун-тет. 2001. С.297-323.

3. Мишенин С.Г., Ибрагимов Ш.З. Использование данных о фазовых превращениях титаномagnetитов для оценки глубины формирования трапповых силлов // Проблемы алмазной геологии и некоторые пути их решения. Воронеж: Воронежский ГУ, 2001, С. 93-96.

4. Мишенин С.Г., Толстов А.В., Харунжия В.А. Петрофизическая и радиологическая характеристика Томторского месторождения // Проблемы геологии и металлогении северо-востока Азии на рубеже тысячелетий. Билибинские чтения, Т.1. Магадан, 2001, С. 266-268.

5. Методическое пособие по прогнозированию коренной алмазности. Отв. исполн.

Никулин В.И., Мишенин С.Г. Том 2. Иркутск-Мирный, 1997, 124 с.

6. Толстов А.В., Коваль С.Г., Мишенин С.Г. Условия концентрации и основные закономерности образования уникальных пниобий-редкоземельных руд // Редкие металлы Украины – взгляд в будущее. Сб. статей, Киев: ИГН НАН Украины, 2001, С. 96-98.

7. Томшин М.Д., Лелюх М.И., Мишенин С.Г., Сунцова С.П., Копылова А.Т., Убинин С.Г. Схема развития траппового магматизма восточного борта Тунгусской синеклизы // Отечественная геология, №5. 2001, С.19-27.

8. Kravchinsky V.A., Konstantinov K.M., Courtillot V., Savrasov J.I., Valet J.-P., Mishenin S.G., Cherniy S.D., Parasotka B.S. Paleomagnetism of East Siberian traps and kimberlites: two new poles and paleogeographic reconstructions at about 360 and 250 Ma // Geophys. J. Int., № 148. 2002. P.1-33.

Б. Фондовые отчеты Амакинской ГРЭ АК «АЛРОСА»

9. Мишенин С.Г., Сунцова С.П. и др. Отчёт по теме: «Разработка методики петромагнитных исследований в целях обеспечения интерпретации материалов аэромагнитной съёмки на площадях широкого развития пород трапповой формации за 1991-1993гг.». АГРЭ, п.Айхал. 1994, 309 с.

10. Никулин В.И., Лелюх М.И., Мишенин С.Г. и др. «Теоретические вопросы прогноза алмазности, сравнительный анализ и региональная оценка перспектив алмазносных районов Австралии и Западной Якутии». АГРЭ, п.Айхал, 1997, 428 с.

11. Убинин С.Г., Мишенин С.Г., Томшин М.Д. и др. Отчет о результатах исследований первого этапа по теме «Создание корреляционных схем базитового магматизма восточной части Тунгусской синеклизы, в том числе Далдыно-Алакитского и Мало-Ботубинского алмазносных районов» за 1996-2001 г.г., АГРЭ, Айхал, 2001, 284 с.

А.И.Михайлов